

LRB 면진장치를 적용한 원전구조물의 지진응답에 따른 확률론적 연구

A Probabilistic Study on Seismic Response of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures using Lead Rubber Bearing

김현정¹⁾ · 송종걸^{1)*} · 문지호¹⁾

Kim, Hyeon-Jeong¹⁾ · Song, Jong-Keol^{1)*} · Moon, Ji-Ho¹⁾

¹⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The seismically isolated nuclear power plants shall be designed for design basis earthquake (DBE) and considered to ensure safety against beyond design basis earthquake (BDBE). In order to limit the excessive displacement of the seismic isolation system of the seismically isolated structure, the moat is installed at a certain distance from the upper mat supporting the superstructure. This certain distance is called clearance to stop (CS) and is calculated from the 90th percentile displacement of seismic isolation system subjected to BDBE. For design purposes, the CS can be obtained simply by multiplying the median displacement of the seismic isolation system against DBE by scale factor with a value of 3. The DBE and BDBE used in this study were generated by using 30 sets of artificial earthquakes corresponding to the nuclear standard design spectrum. In addition, latin hyper cube sampling was applied to generate 30 sets of artificial earthquakes corresponding to maximum - minimum spectra. For the DBE, the median displacement and the 99th percentile displacement of the seismic isolation system were calculated. For the BDBE, the suitability of the scale factor was assessed after calculating the 90th percentile displacement of the seismic isolation system.

Key words: Lead-rubber bearing (LRB), Displacement scale factor, Beyond design basis earthquake, Probability density function (PDF), 90th percentile displacement, Bi-linear

1. 서론

2016년 9월에 규모 5.8의 912 지진(경주지진)이 발생하면서 우리나라도 강진이 발생할 수 있다는 것을 많은 국민들이 인식하는 계기가 되었다. 특히 이번 경주지진의 진앙지 부근에는 많은 수의 원자력 발전소(이하 원전)들이 위치하고 있는 관계로 강진 발생 시에 원전에 대한 안전성의 우려가 많이 대두되고 있는 상황이다. 경주지진으로 인한 대부분의 구조물과 원전 등에서 의미 있는 피해나 손상은 발생하지 않았지만 경주지진을 토대로 국내에 발생한 강진의 특성을 분석하고 이에 대비하는 실질적인 노력이 필요하다.

본 연구는 납-고무 받침(lead rubber bearing)에 의해 면진된 원전 구조

물의 강진에 대한 지진응답을 확률론적 방법을 이용하여 평가하는 것이 주된 목적이다. ASCE/SEI 43-05 보고서[1]에서 원전의 두 가지 확률론적 평가에 기반한 성능목표를 제시하고 있다. 첫째 성능목표는 설계기준지진(100% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 1% 이하이고, 둘째 성능목표는 설계초과지진(150% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 10% 이하가 되는 것이다. 이와 같은 두 가지 성능목표가 만족되도록 면진된 원전구조물이 확률론적 방법에 의해 설계가 이루어지도록 하는 것이 현재 및 앞으로의 설계추세로 볼 수 있다. 본 연구는 두 번째 성능목표와 관련된 면진 원전구조물의 주요 설계변수에 대하여 확률론적인 방법으로 연구를 수행하였다.

면진장치의 변위응답이 면진된 원전 구조물의 주요설계 변수이기 때문에 지진응답은 면진장치의 변위응답을 위주로 평가하였다. 면진 원전에 대한 면진장치의 설계에서 과도한 횡방향 변위응답은 면진장치의 심각한 손상 또는 파괴를 유발할 수 있고, 원전에서 면진된 구조물과 면진되지 않은 구조물 사이를 연결하는 배관 등과 같은 연결 시설물에 과도한 상대변위를 유발시켜서 원전의 안전성을 크게 저해할 수 있다. 이러한 과도한 면진장치의 횡

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received August 14, 2017; Revised January 29, 2018; Accepted January 29, 2018)

방향 변위를 특정 범위내로 한정하기 위하여 면진 원전 주변에 충돌 정지 (hard stop)를 위한 벽체구조물을 설계하여 설치하는 데 이를 정지체(moat wall)라고 한다. 정지체를 두는 이유는 설계지진하중 보다 큰 설계초과지진이 발생할 경우에는 면진장치에 설계에서 고려한 변위응답보다 과도한 변위응답이 유발될 가능성이 있으므로 이를 특정 범위내로 한정하기 위하여 면진 원전의 하부매트와 정지체의 충돌에 의하여 강제적으로 변위응답을 제한하고자 하는 목적이다. 정지체와 면진된 원전구조물의 하부에 위치한 매트 구조물 사이의 공간 또는 간격을 정지거리(clearance to stop)로 정의 하며 정지거리는 일반적으로 설계초과지진(beyond design basis earthquake, BDBE)을 사용한 경우에 대한 면진장치의 90 백분위수(90th %-ile)의 변위값으로 정한다. 정지거리도 면진 원전의 중요한 설계변수로서 설계 초과지진들에 대한 확률론적 분석에 의해 구하여야 하며 많은 지진하중과 설계 조건에 따라서 분석하여야 하므로 설계상의 목적으로는 추가적인 많은 노력을 필요로 하는 어려운 작업이다. 이러한 설계과정을 간단히 하기 위해서는 설계기준지진에 대한 면진장치의 변위응답의 중앙값(또는 50 백분 위수)에 대하여 설계초과지진에 대한 면진장치의 90 백분위수 변위값이 몇 배가 되는지를 평가한 변위비율계수(displacement scale factor)를 구하여 사용하는 것이 합리적이다. Huang 등의 MCEER 보고서에서는 90 백분위 수 설계초과지진 변위는 설계기준지진 중앙값에 3의 계수를 곱해서 구할 수 있다고 제시하였다 [2]. 국내 원전구조물의 면진설계를 위한 정지거리 산정 시에 간편하게 적용할 수 있는 변위비율계수를 국내 원전구조물의 구조해 석모델과 이에 적합하도록 설계된 면진장치를 이용하여 확률론적으로 평 가하였다. 설계초과지진은 설계기준지진의 150%, 167%, 200%를 각각 적용하여 평가하였다.

2. 납-고무받침을 적용한 원전구조물의 지진해석모델

2.1 원전구조물 지진해석 모델링

납-고무 받침과 같은 면진장치에 의해 면진된 원전구조물의 전형적인 형태는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 면진장치는 원전구조물을 지지하는 상부밀면매트와 기초부를 지지하는 하부밀면매트 사이에 위치하며 면진장치 의 횡방향 거동의 유연성을 통하여 상부구조물로 전달되는 지진하중을 감소시키는 역할을 한다. 본 논문에서 사용된 원전구조물의 상부구조물은 격납 구조물과 내부구조물, 보조구조물로 구분되어있다. 격납구조물의 높이는 84.201 m, 내부구조물의 높이는 41.453 m이다. 상부밀면매트, 면진장치, 하 부밀면매트를 포함한 면진층의 두께는 16.764 m이다. Fig. 1에 나타난 실

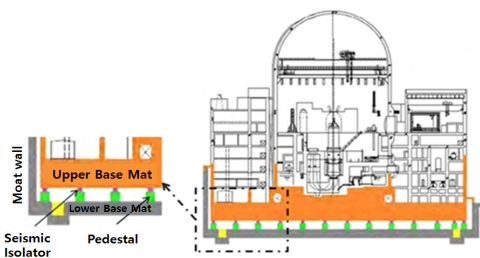
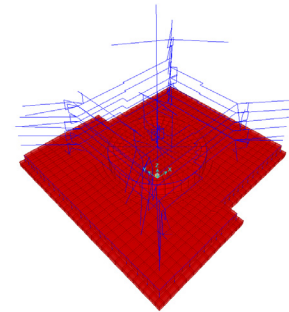
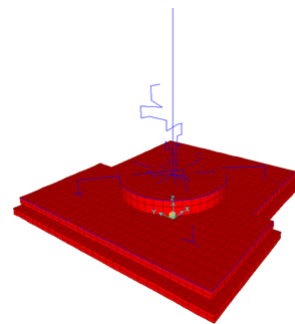


Fig. 1. Typical model of seismically isolated nuclear power plant

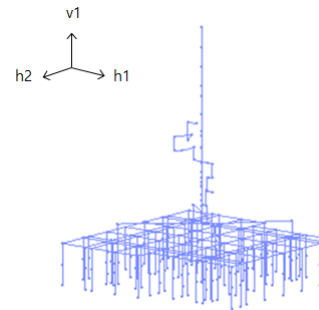
규모의 원전구조물을 beam-stick 모델을 이용하여 간략화 된 모델로 전환 하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에 나타난 모델이 beam-stick 모델을 사용한 면진원전의 모델이다. 그러나 이 또한 상부구조물을 나타내는 beam-stick 요소가 많은 관계로 해석에 많은 노력이 소요되므로 이를 등가의 축소된 개수의 beam-stick으로 전환한 모델이 Fig. 2(b)에 나타난 간략 화 된 beam-stick 모델이다. 간략화 된 beam-stick 모델의 정확성은 SAP 2000 프로그램 [3]을 사용하여 Fig. 2(a), (b)에 나타난 해석모델의 고유치 해석의 진동수와 진동모드의 비교를 통하여 검증하였다. Fig. 2(b)에 나타 낸 간략화 된 beam-stick 모델을 OpenSEES 프로그램 [4]에 적용가능 하 도록 전환한 해석모델을 Fig. 2(c)에 나타내었다. OpenSEES 프로그램을 이용한 경우에 대한 구조해석모델의 정확성을 확인하는 과정도 Open SEES 프로그램을 이용한 고유치해석결과를 SAP2000을 이용한 고유치 해석결과와 비교하여 확인하였으며, 고유치해석결과의 비교를 Table 1에 나타내었으며 해석모델에 따른 고유치해석결과의 차이가 오차범위수준으 로 거의 없음을 알 수 있다. 단, Table 1에 나타난 고유주기는 면진장치가 설 경우에 대한 원전구조물의 고유주기를 비교한 것이다. 이는 면진장치가 설



(a) Beam-stick model (SAP2000)



(b) Simplified beam-stick model (SAP2000)



(c) Simplified beam-stick model (OpenSEES)

Fig. 2. Analytical modeling of seismically isolated nuclear power plant

치되면 면진모드가 저차모드로 나타나기 때문에 해석모델에 따른 원전구조물 자체의 고유주기를 정확하게 비교하기 위하여 면진장치를 제거하고 고유주기를 비교한 것이다.

2.2 면진장치 모델링

면진장치를 이용한 면진적용의 개념은 지반과 구조물 사이에 유연한 횡방향 강성을 가진 전단변형 장치를 설치하여 지반과 구조물을 분리시키는 방법으로 구조물의 고유주기를 장주기화하여 구조물에 전달되는 지진가속도의 크기를 감소시키며 면진장치가 대부분의 지진에너지를 소산시켜 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 저감시키는 원리이다. 대표적인 면진장치의 예로는 납-고무받침, 마찰진자시스템(friction pendulum system), EQS (eradi quake system) 등이 있다. 본 연구에 사용된 면진장치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 납-고무받침으로 현재까지 원전 구조물의 면진에 가장 많이 적용하고 있다. 납-고무받침은 얇은 두께의 고무층들과 철판층들을 교대로 겹쳐놓은 척추모양의 형태를 가지며 중심부에는 납심이 있으며, 수직강성은 크고 수평강성은 작아서 횡방향으로 유연한 거동을 하는 특성이 있다. 고무의 유연성으로 지진력을 감소시키고, 납의 소성거동을 통해 지진에너지를 소산시킨다[5]. 면진 원전구조물에서 면진장치를 상부구조물의 밑면

매트와 하부구조물의 받침대 사이에 설치한다.

원전 구조물의 지중이 매우 크기 때문에 이를 지지하는 면진장치의 개수는 일반적으로 수백 개에 달한다. 본 연구에 사용한 원전 구조물의 면진을 위하여 설계된 면진장치가 486개가 필요하지만 해석의 효율성을 높이기 위하여 이를 등가의 지진응답 특성을 가지는 83개의 면진장치로 개수를 줄여서 모델링에 적용하였다. 고유주기가 2초가 되도록 면진장치를 설계하여 적용하였다. 83개로 개수가 축소된 등가 면진장치의 강성은 실제 면진장치의 약 5.855배 정도가 되도록 해석모델의 물성치를 산정하였고, 83개의 면진장치에 대한 개별 물성치는 Table 2에 나타난 바와 같다. 면진장치를 모델링하기 위하여 OpenSEES 프로그램에서 Elastomeric Bearing 명령어[4]를 사용하였으며, 면진장치의 비선형 해석모델은 이선형(Bi-Linear)모델을 적용하였다.

2.3 입력지진의 특성

원전 표준설계스펙트럼에 대응하도록 RspMatch 프로그램 [7]을 이용하여 작성한 인공지진 30개 세트 [8]를 G0라고 하고, G0에 방향성과 변동성을 고려하여 작성한 최대-최소 응답스펙트럼(maximum-minimum spectra) [2, 9]에 대응하는 인공지진 30개 세트 M0라고 구분하여 지진해석에 사용하였다. 최대-최소 응답스펙트럼은 지진운동의 방향성과 변동성을 고려하기 위한 방법으로 Huang et al. [2]이 제안하였다. Fig. 4에는 특정 지진가속도 기록(G0 30세트 중 TCU089 성분) [8]을 사용한 경우에 대한 구조물의 가속도응답의 강축방향과 약축방향 성분이 차이가 날 수 있음을 대표적인 사례로 나타내었다. 이러한 강축의 응답이 최대스펙트럼을 의미하여 약축의 응답이 최소스펙트럼의 의미한다. 직교하는 두 수평방향(h1과 h2 방향)의 가속도 값을 곱하고 이를 제곱근한 식 (1)에 나타난 기하평균(Geomean)으로 지진응답의 크기를 나타낸다면 [10, 11], 강축 방향의 가속도 값

Table 1. Comparison of natural period of nuclear power plant according to analytical model

Program	Analytical model	Natural period (sec)		
		Containment 1 st mode	Inner building 1 st mode	Auxiliary building 1 st mode
SAP2000	Beam-stick	0.269	0.103	0.157
	Simplified beam-stick	0.273	0.105	0.157
OpenSEES	Simplified beam-stick	0.270	0.103	0.157

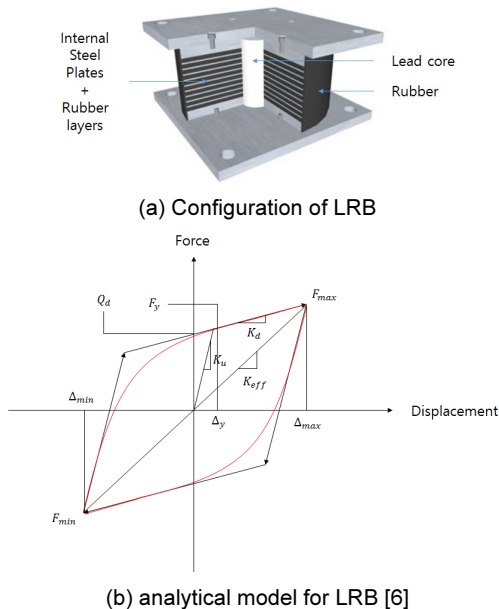


Fig. 3. Lead rubber bearing

Table 2. Design property of LRB (per each unit)

Model	Parameter	Value
Bi-linear LRB model	K_u (Elastic stiffness)	$3.191 \times 10^6 \text{ kN/m}$
	K_d (Second-slope stiffness)	$2.494 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	Q_d (Characteristic strength)	$5.865 \times 10^3 \text{ kN}$
	F_y (Yield strength)	$5.911 \times 10^3 \text{ kN}$

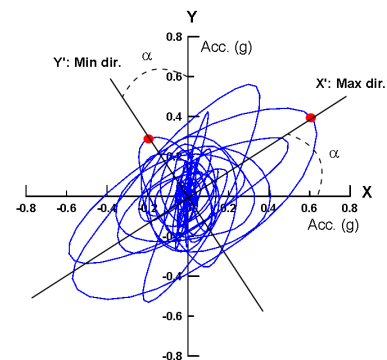


Fig. 4. Typical example of acceleration orbit of a 2-degree-of freedom system used to compute maximum-minimum spectra (TCU072 acceleration record [8] is used)

$(S_{a,max})$ 은 기존 수평방향(h1) 성분에서 F_h 를 곱하고 약축방향의 가속도 값 $(S_{a,min})$ 은 기존 수평방향(h2) 성분에서 $1/F_h$ 를 곱하면 기하평균의 값은 변하지 않게끔 하면서 최대-최소 응답스펙트럼을 작성할 수 있다.

$$G_{eomean} = \sqrt{S_{a,max} \times S_{a,min}} \tag{1}$$

원전표준스펙트럼에 맞게 작성된 G0 그룹의 인공지진을 사용하여 작성한 응답스펙트럼을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 해의 강진지역 수출용 원전의 면진설계를 위하여 영주기가속도(ZPA)는 0.5 g로 작성하였으며 수평 두방향 h1, h2과 수직방향 v1을 하나의 세트로 한다.

G0에 사용된 인공지진 30세트로부터 지진의 강축 및 약축 방향에 대한

방향성을 고려하고 또한 변동성을 고려하여 작성한 인공지진 30세트가 M0이다. 즉, M0는 G0 입력지진의 h1축 성분에서 F_h (수평방향), h2축 성분에서 $1/F_h$, v1축 성분에서 F_v (수직방향) 값을 무작위로 곱하여 구한 30세트의 입력지진을 말한다. 지진그룹 M0을 사용하여 작성한 최대-최소 응답스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. F_h 와 F_v 의 확률변수는 Huang 등의 연구결과 [2]인 M_w (모멘트 규모) 6.5 이상, 15 km 미만의 진원의 근거리지진 147세트의 실제 지진을 통해 구한 값을 사용하였으며, 본 연구에 적용한 F_h 의 중앙값(θ)은 1.3, 대수표준편차(β)는 0.13, F_v 의 중앙값(θ)은 1.0, 대수표준편차(β)는 0.18이다 [2]. 이와 같은 대수정규분포를 가지는 확률밀도함수에 대하여 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling, LHS)방법을 이용하여 30개의 F_h 와 F_v 값을 구하였고 이를 Fig. 7과 Table 3에 나타내었

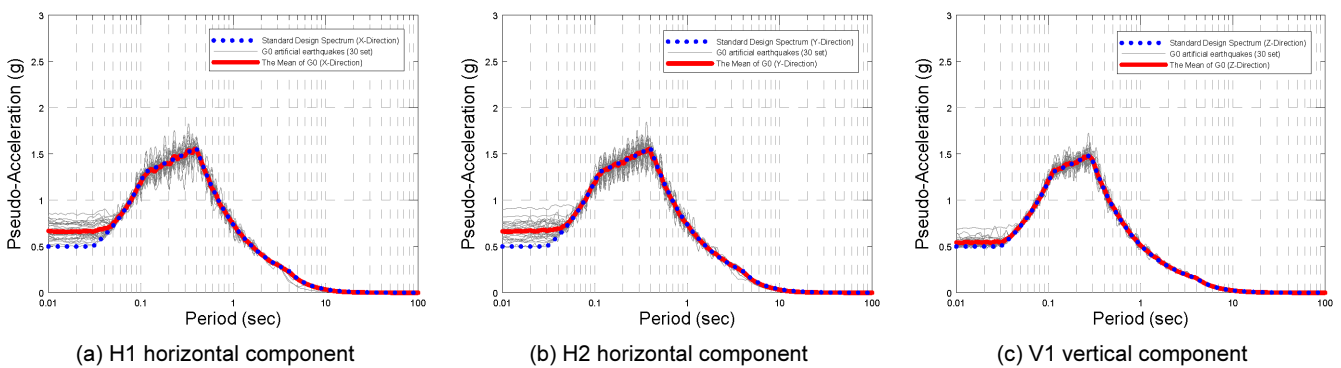


Fig. 5. Comparison of response spectrum for G0 group of 30 set artificial earthquakes corresponding to standard design spectrum

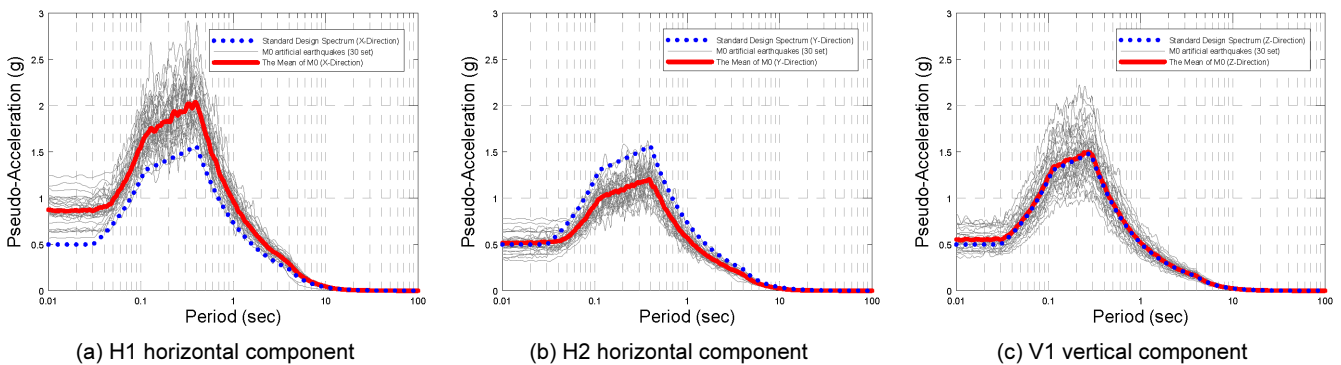


Fig. 6. Comparison of maximum-minimum response spectrum for M0 group

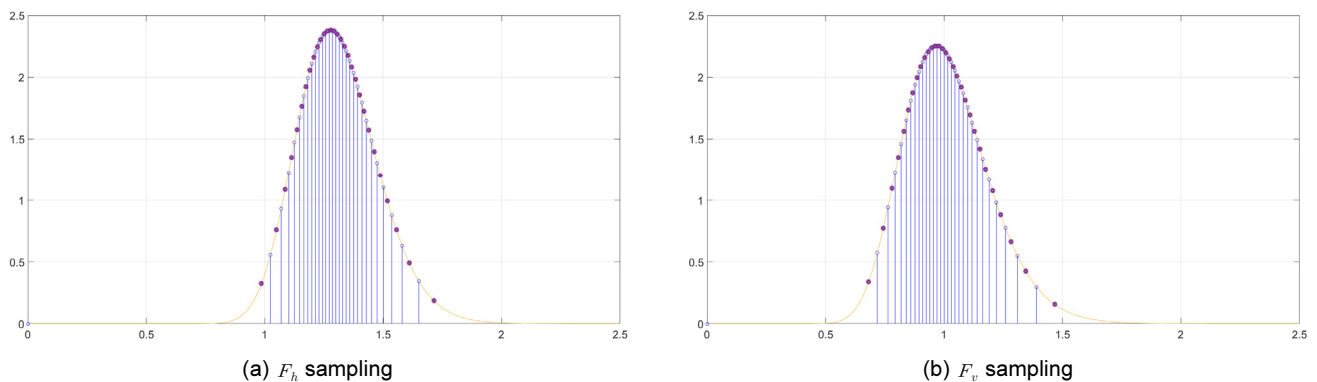


Fig. 7. F_h and F_v sampling by using latin hypercube sampling method

다. G0 지진그룹과 M0 지진그룹을 대표하여 TCU072 가속도기록 [8]을 이용한 인공지진을 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 인공지진은 Fig. 8(a)에 나타낸 G0 지진그룹의 TCU072 지진기록은 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공합성지진가속도이므로 최대지반가속도가 0.5 g로 일정한 반면에 Fig. 8(b)에 나타낸 M0 지진그룹의 TCU072 지진기록은 지진의 강축 및 약축 방향의 방향성을 고려하기 위하여 h1축 성분에 $F_h (=1.714)$, h2축 성분에 $1/F_h (=0.583)$, v1축 성분에 $F_v (=1.039)$ 값을 Fig. 8(a)에 나타낸 G0 지진 그룹의 TCU072 성분에 곱하여 스케일을 조정하였다.

2.4 면진장치 변위응답의 확률분포

설계초과지진의 90 백분위수 변위($D_{90th \% - ile}$)를 계산하기 위해서 30 개 지진세트에 대한 개별 수평방향(h1과 h2) 최대변위응답들의 벡터합을 구하고 이 값을 면진장치의 최대변위응답으로 사용한다. 이러한 과정의 대표적인 예로서 개별 인공지진가속도 기록에 대하여 최대변위응답을 수평

Table 3. F_h and F_v by using Latin Hypercube sampling method

F_h	0.986, 1.050, 1.086, 1.113, 1.136, 1.156, 1.174, 1.191, 1.207, 1.222, 1.236, 1.251, 1.265, 1.279, 1.293, 1.307, 1.321, 1.336, 1.351, 1.367, 1.383, 1.401, 1.419, 1.439, 1.462, 1.488, 1.518, 1.556, 1.610, 1.714
F_v	0.682, 0.744, 0.780, 0.807, 0.830, 0.850, 0.868, 0.886, 0.902, 0.918, 0.933, 0.948, 0.963, 0.978, 0.993, 1.008, 1.023, 1.039, 1.055, 1.072, 1.090, 1.109, 1.129, 1.151, 1.176, 1.205, 1.239, 1.283, 1.345, 1.467

방향 변위응답의 벡터합으로 부터 구하는 과정을 Fig. 9에 나타내었다. 벡터합으로 구한 수평방향의 최대변위응답을 G0와 M0 지진그룹의 각각 30 개 인공지진에 대하여 구하여 Fig. 10에 비교하여 나타내었다.

30개의 최대변위응답들을 사용하여 정규분포 및 로그정규분포에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 식 (2)와(3)을 이용하여 구한다. 여기서, m 은 평균값, σ 는 표준편차이다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

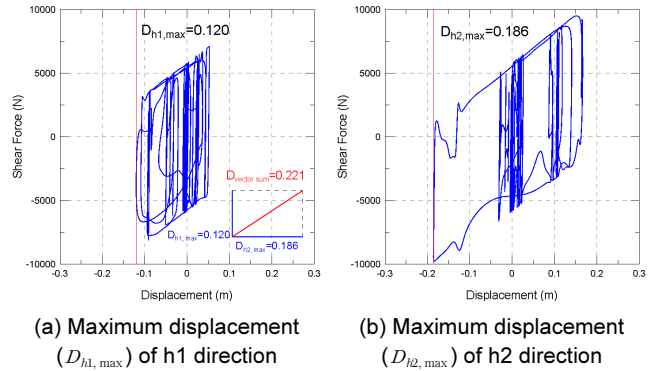
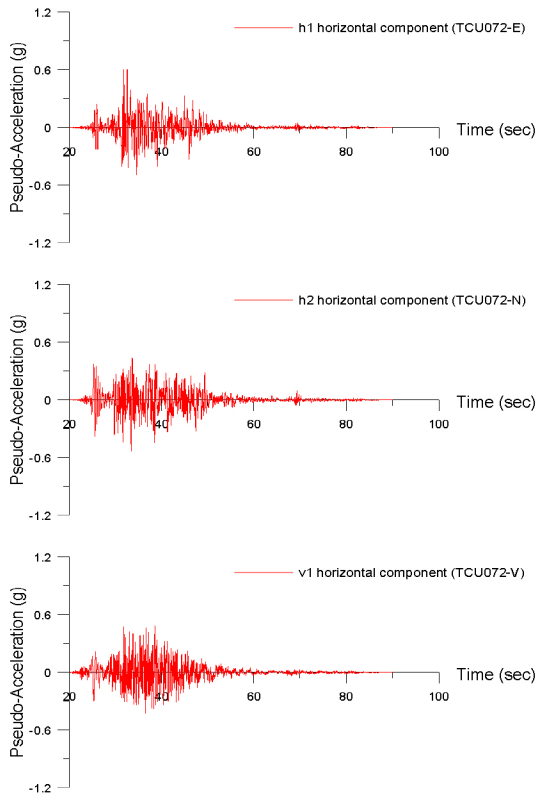
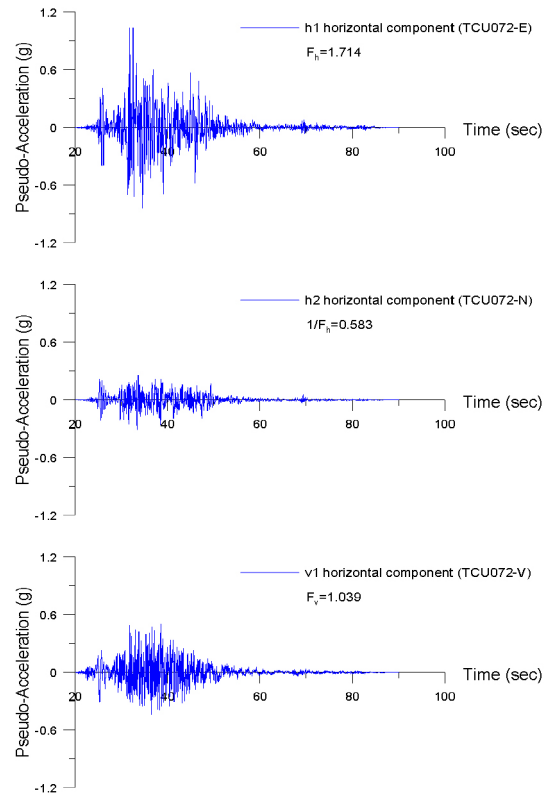


Fig. 9. Example of calculating the maximum displacement response (D_{max}) by vector sum of horizontal displacement responses ($D_{h1,max}$, $D_{h2,max}$) for CLS220 component



(a) TCU072 component of G0 group



(b) TCU072 component of M0 group

Fig. 8. Example of artificial acceleration record (TCU072 component [8]) corresponding to G0 and M0 group

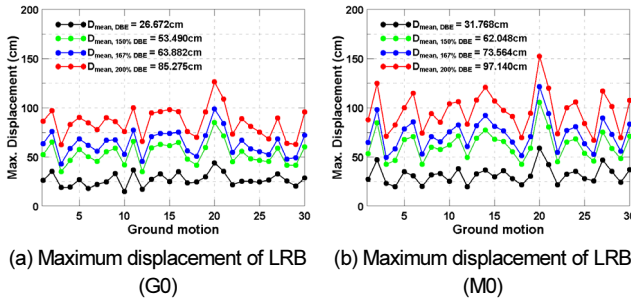


Fig. 10. Comparison of maximum displacement (D_{max}) of seismic isolation system for 30 sets of artificial acceleration records for G0 and M0 earthquake groups

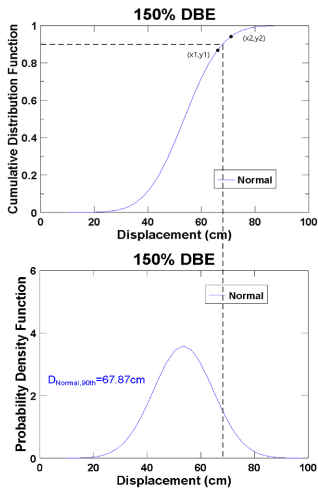


Fig. 11. Example of 90th percentile displacement response ($D_{90th\% - ile}$) calculation process using PDF and CDF

$$\text{로그정규분포 } f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} x \sigma} e^{-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

확률밀도함수로부터 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 계산한다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 누적분포함수 0.9에 대응하는 확률밀도함수의 변위값을 구하면 이 값이 설계초과지진의 90 백분위수 변위이다. 즉, 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile}$)는 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 누적분포함수의 0.9에 인접한 두 개의 좌표값 (x_1, y_1)과 (x_2, y_2)에 대하여 식 (4)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서, 누적분포함수의 가로축을 x 축, 세로축을 y 축으로 하여 구한 두 좌표값이 이루는 직선의 기울기 a 는 $(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$ 이다.

$$D_{90th\% - ile} = x_1 + \frac{0.9 - y_1}{a} \quad (4)$$

계산된 설계초과지진의 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile}$)를 설계기준지진의 변위 중앙값으로 나눈 값을 변위비율계수(Displacement Scale Factor)로 정의한다. Fig. 11에 나타낸 설계초과지진의 90 백분위수 변위를 구하는 과정을 정규분포를 사용한 경우에 대하여 설명하면 다음과 같다. G0 지진그룹에 대한 설계초과지진(150% DBE)의 90 백분위수 변위는 변위

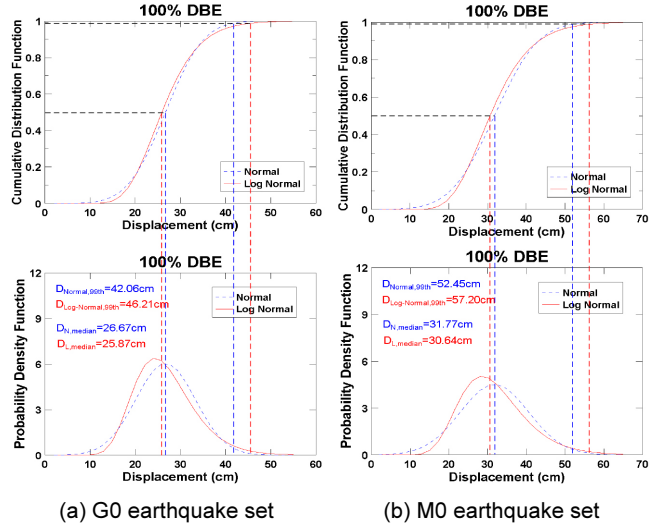


Fig. 12. Calculation procedure of median and 99th %-ile displacements for design basis earthquakes

Table 4. Comparison of median and 99th %-ile displacements for design basis earthquakes

Earthquake type.	PDF type	$D_{median, DBE}$ (cm)	$D_{99th\% - ile, DBE}$ (cm)	$DSF_{DBE} = \frac{D_{99th\% - ile, DBE}}{D_{median, DBE}}$
G0	Normal	26.67	42.06	1.58
	Log normal	25.87	46.21	1.79
M0	Normal	31.77	52.45	1.65
	Log normal	30.64	57.20	1.87

응답의 확률분포를 정규분포로 가정할 경우에 67.87 cm로 계산된다. 또한 G0 지진그룹의 설계기준지진(DBE)에 대한 면진장치 변위응답의 중앙값은 26.67 cm이다. 설계초과지진에 대한 면진장치의 90 백분위수 변위와 설계기준지진에 대한 면진장치의 변위 중앙값을 비교하면 변위비율계수는 2.55배이다.

3. 면진장치의 변위응답에 대한 확률론적 분석

3.1 설계기준지진(DBE)에 대한 99 백분위수 변위의 평가

ASCE/SEI 43-05 보고서 [1]에서 원전의 두 가지 성능목표를 제시하고 있다. 첫째 성능목표는 설계기준지진(100% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 1% 이하이고, 둘째 성능목표는 설계초과지진(150% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 10% 이하가 되는 것이다. 이 성능목표를 원전구조물의 면진장치 적용한다면, 첫째 성능목표는 설계기준지진에 대한 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)와 관련이 있으며, 둘째 성능목표는 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)와 관련이 있다. 즉, 설계기준지진에 대한 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)와 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)가 각각 허용 한계치에 해당하는 변위 값을 초과하지 않는다면 성능목표가 달성되었다고 볼 수 있다.

설계기준지진(100% DBE)에 대한 변위중앙값($D_{median,DBE}$)과 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile,DBE}$)를 구하는 과정을 Fig. 12에 나타내었다. 지진하중으로는 G0와 M0 두 그룹의 지진 각각 30개씩 적용하였으며 변위응답의 확률밀도함수는 정규분포와 대수정규분포로 구분하여 적용하여 나타내었다. Fig. 12에 나타난 변위중앙값($D_{median,DBE}$)과 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile,DBE}$) 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

원전 표준스펙트럼에 대응하도록 생성된 G0 지진그룹에 비하여 최대-최소 응답스펙트럼에 대응하도록 생성된 M0 지진그룹의 변위응답들이 전반적으로 크게 나타나기 때문에, 변위중앙값($D_{median,DBE}$)은 약 1.19배, 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile,DBE}$)는 약 1.02배 정도로 M0 지진그룹이 G0 지진그룹에 비하여 크게 나타난다. 확률밀도함수를 정규분포로 사용한 경우의 변위중앙값($D_{median,DBE}$)이 로그정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.03배 정도 크지만, 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile,DBE}$)는 반대로 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.09배 정도 크게 나타난다. 이는 로그정규분포를 사용하는 경우가 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile,DBE}$) 응답을 보다 보수적으로 평가함을 의미한다.

3.2 설계초과지진(BDBE)에 대한 90 백분위수 변위의 평가

ASCE/SEI 4-16 [12]와 KEPIC-STC 면진구조 설계기준(안) [13]에 의하면 면진된 원전구조물의 과도한 변위응답을 방지하기 위한 정지거리는 설계초과지진(150% DBE)의 90 백분위수 변위 이상이 되도록 설계하여야 한다. 즉, 면진된 원전구조물과 정지체(moat wall) 사이의 떨어진 거리인 정지거리를 정하기 위하여는 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile,BDBE}$)의 평가가 필수적이다. 정지거리는 면진 원전의 둘째 성능목표인 설계초과지진(150% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 10% 이하가 되어야 하는 것과 관련이 있다.

설계초과지진으로는 150%, 167%, 200% DBE를 사용하였다. 150% DBE는 설계초과지진으로 ASCE/SEI 4-16 [12]에서 언급하고 있으며, 167% DBE는 NUREG 보고서 [14]에서 사용하고 있는 값이다. 200% DBE는 설계초과지진으로는 문헌에 언급되어 있지 않고 과도한 값이지만 연구결과의 비교를 위하여 추가한 설계초과지진 값이다.

세 가지 크기의 설계초과지진들(150%, 167%, 200% DBE)에 대한 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile,BDBE}$)를 구하는 과정을 Fig. 13에 나타내었다.

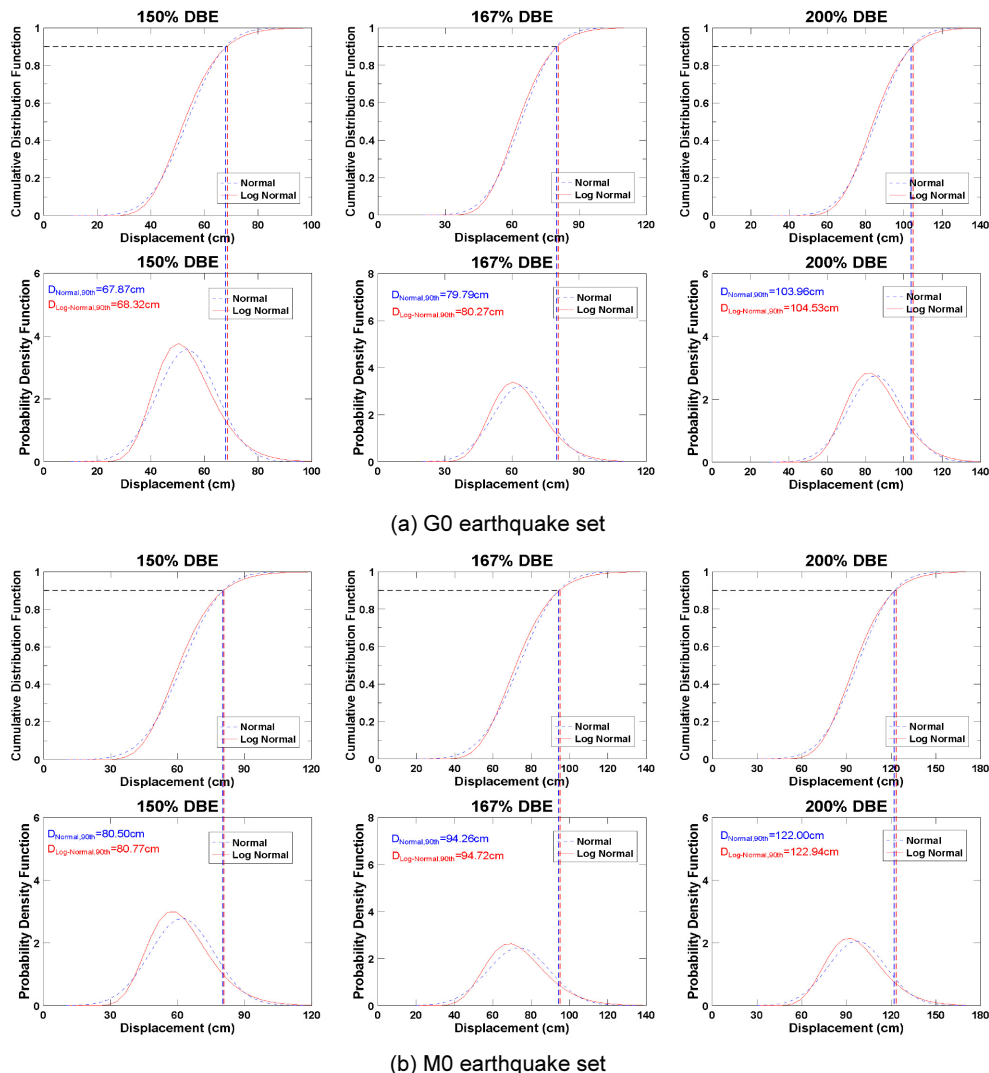


Fig. 13. Calculation procedure of 90th %-ile displacements for beyond design basis earthquakes

즉, 누적분포함수(CDF)의 0.9(90%)에 대응하는 확률밀도함수(PDF)의 변위 값을 구하면 그 값이 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)이다. 지진 하중으로는 G0와 M0 두 그룹의 지진 각각 30개씩 적용하였으며 변위응답의 확률밀도함수는 정규분포와 로그정규분포로 구분하여 적용하여 나타내었다. Fig. 13에 나타난 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$) 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)는 M0 지진그룹의 경우가 G0 지진그룹에 비하여 약 1.17~1.19배 정도 크게 나타난다. 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)는 확률밀도함수를 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.00~1.01배 정도 크게 나타난다. 이는 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)의 평가에 확률밀도함수의 분포의 차이는 크지 않음을 의미한다.

ASCE/SEI 4-16 [12]와 KEPIC-STC 면진구조 설계기준(안) [13]에 의하면 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$) 평가에 설계초과지진을 사용한 지진해석이 어려울 경우에 이를 대신하여 설계기준지진에 대한 면진장치 변위응답 중앙값($D_{median, DBE}$)에 3을 곱하여 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)를 구하는 것을 제시하고 있다. 계수값 3은 Huang et al. [2]의 연구결과에 근거를 두고 있다. 설계기준지진에 대한 면진장치의 변위응답 중앙값($D_{median, DBE}$)에 대한 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)의 비를 변위비율계수(DSF_{BDBE})로 다음과 같이 정의한다.

$$DSF_{BDBE} = \frac{D_{90th\% - ile, BDBE}}{D_{median, DBE}} \quad (5)$$

변위비율계수(DSF_{BDBE})를 Table 4에 나타난 변위응답 중앙값($D_{median, DBE}$)과 Table 5에 나타난 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)을 식 (5)에 적용하여 Table 6에 나타내었다. Tables 5, 6의 결과의 차이를 분석하기 위하여 Fig. 14에 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, BDBE}$)와 변위비율계수(DSF_{BDBE})를 확률밀도함수와 지진의 종류에 대하여 비교하여 나타내었다. 150% DBE에서는 변위비율계수가 약 2.53~2.64의 분포를 나타내며

Table 5. Comparison of 90th %-ile displacements for beyond design basis earthquakes

Earthquake type.	PDF type	$D_{90th\% - ile, BDBE}$ (cm)		
		150% DBE	167% DBE	200% DBE
G0	Normal	67.87	79.79	103.96
	Log normal	68.32	80.27	104.53
M0	Normal	80.50	94.26	122.00
	Log normal	80.77	94.72	122.94

Table 6. Comparison of displacement scale factor (DSF)

Earthquake type.	PDF type	$DSF_{BDBE} = \frac{D_{90th\% - ile, BDBE}}{D_{median, DBE}}$		
		150% DBE	167% DBE	200% DBE
G0	Normal	2.55	2.99	3.90
	Log normal	2.64	3.10	4.04
M0	Normal	2.53	2.97	3.84
	Log normal	2.64	3.09	4.01

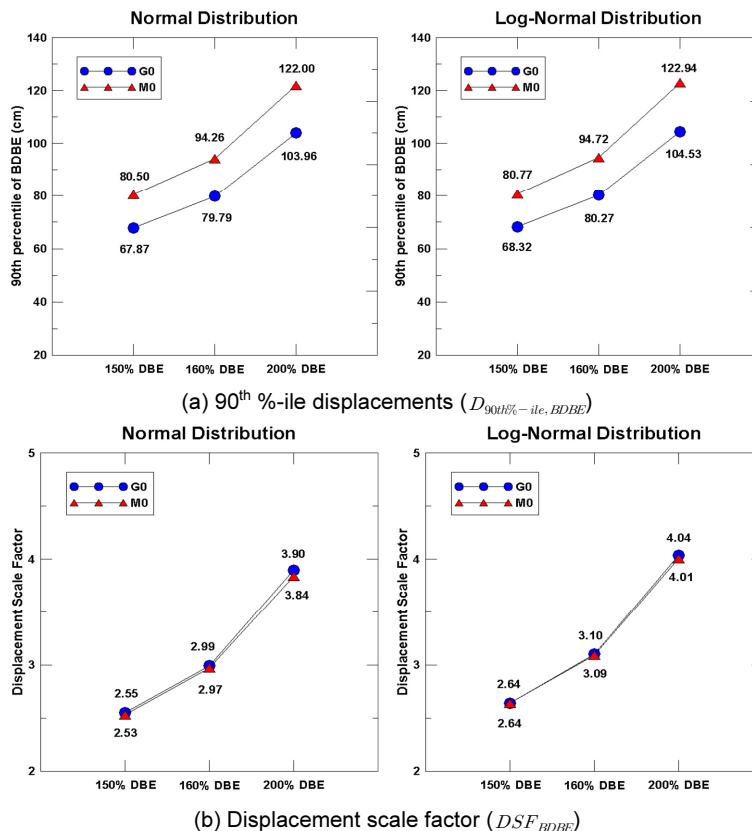


Fig. 14. Comparison of 90th %-ile displacements ($D_{90th\% - ile, BDBE}$) and displacement scale factor (DSF_{BDBE})

로 ASCE/SEI 4-16 [12]에서 제시한 3의 값보다 작게 나타남을 알 수 있기 때문에 ASCE/SEI 4-16 [12]에서 제안한 변위비율계수가 보수적임을 알 수 있다. 167% DBE에서는 변위비율계수가 약 2.97~3.10의 분포를 나타내므로 ASCE/SEI 4-16 [12]에서 제시한 3의 값에 근접한 결과를 나타낸다. 200% DBE에서는 변위비율계수가 약 3.84~4.04의 분포를 나타낸다. 이를 통하여 설계초과지진으로 167% DBE를 사용할 경우의 변위비율계수를 3을 사용할 경우에는 신중하게 적용할 필요가 있다고 판단된다. 200% DBE를 설계초과지진으로 사용할 경우에는 변위비율계수로 4를 사용하는 것을 검토해 볼 필요가 있다.

변위비율계수(DSF_{DBE})는 M0 지진그룹의 경우가 G0 지진그룹에 비하여 약 0.99~1.00배 정도로 지진에 따른 영향은 거의 음을 알 수 있다. 변위비율계수(DSF_{DBE})는 확률밀도함수를 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.03~1.05배 정도로 약간 크게 나타난다. 변위비율계수(DSF_{DBE})는 지진하중그룹과 확률밀도함수의 차이에 따른 값 차이가 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

Huang et al. [2]의 연구에서 150% DBE의 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, DBE}$)가 100% DBE의 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)보다 크게 나타난다고 평가하였다. 본 연구에서는 Tables 4와 5로부터 150% DBE의 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, DBE}$)가 100% DBE의 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)보다 약 1.41~1.61배 정도 크게 평가함을 알 수 있다. 이는 면진 원전의 정지거리 산정의 관점에서는 원전 구조물의 두 성능목표 중에서 두 번째 성능목표인 설계초과지진(150% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 10% 이하가 되도록 하면, 첫 번째 성능목표인 설계기준지진(100% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 1% 이하가 당연히 만족함을 의미하는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 납-고무 받침으로 면진된 원전구조물의 지진해석을 통하여 면진장치의 설계기준지진에 대한 99 백분위수 변위와 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위응답 등을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원전 표준스펙트럼에 대응하도록 생성된 G0 지진그룹에 비하여 최대-최소 응답스펙트럼에 대응하도록 생성된 M0 지진그룹의 변위응답들이 전반적으로 크게 나타나기 때문에, 변위중앙값($D_{median, DBE}$)은 약 1.2배, 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)는 약 1.2배 정도로 M0 지진그룹이 G0 지진그룹에 비하여 크게 나타난다.
- 2) 확률밀도함수를 정규분포로 사용한 경우의 변위중앙값($D_{median, DBE}$)이 로그정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.03배 정도 크지만, 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)는 반대로 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.09배 정도 크게 나타난다. 이는 로그정규분포를 사용하는 경우가 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$) 응답을 보다 보수적으로 평가함을 의미한다.
- 3) 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, DBE}$)는 M0 지진그룹의 경우가 G0 지진그룹에 비하여 약 1.17~1.19배 정도 크게 나타난다. 90 백분위수 변

위($D_{90th\% - ile, DBE}$)는 확률밀도함수를 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.00~1.01배 정도 크게 나타난다. 이는 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, DBE}$)의 평가에 확률밀도함수의 분포의 차이는 크지 않음을 의미한다.

- 4) 150% DBE에서는 변위비율계수가 약 2.53~2.64의 분포를 나타내므로 ASCE/SEI 4-16에서 제시한 3의 값보다 작게 나타남을 알 수 있기 때문에 ASCE/SEI 4-16에서 제안한 변위비율계수가 보수적임을 알 수 있다. 167% DBE에서는 변위비율계수가 약 2.97~3.10의 분포를 나타내므로 ASCE/SEI 4-16에서 제시한 3의 값보다 약간 상회하는 값을 나타낸다. 200% DBE에서는 변위비율계수가 약 3.84~4.04의 분포를 나타낸다. 이를 통하여 설계초과지진으로 167% DBE를 사용할 경우의 변위비율계수를 3을 사용할 경우에는 신중하게 적용할 필요가 있다고 판단된다. 200% DBE를 설계초과지진으로 사용할 경우에는 변위비율계수로 4를 사용하는 것을 검토해 볼 필요가 있다.
- 5) 변위비율계수(DSF_{DBE})는 M0 지진그룹의 경우가 G0 지진그룹에 비하여 약 0.99~1.00배 정도 나타난다. 변위비율계수(DSF_{DBE})는 확률밀도함수를 로그정규분포를 사용한 경우가 정규분포를 사용한 경우에 비하여 약 1.03~1.05배 정도 크게 나타난다. 변위비율계수(DSF_{DBE})는 지진하중그룹과 확률밀도함수의 차이에 따른 값 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.
- 6) 150% DBE의 90 백분위수 변위($D_{90th\% - ile, DBE}$)가 100% DBE의 99 백분위수 변위($D_{99th\% - ile, DBE}$)보다 약 1.41~1.61배 정도 크게 평가함을 알 수 있다. 이는 면진 원전의 정지거리 산정의 관점에서는 원전 구조물의 두 성능목표 중에서 두 번째 성능목표인 설계초과지진(150% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 10% 이하가 되도록 하면, 첫 번째 성능목표인 설계기준지진(100% DBE)에 대한 비허용 성능의 발생확률이 1% 이하가 당연히 만족함을 의미하는 것이다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.NRF-2015R1D1A3A01020276)에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다. 또한 이 연구는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520170166).

/ REFERENCES /

1. American Society of Civil Engineers (ASCE). Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities. ASCE 43-05. c2005.
2. Huang YN, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL. Assessment of base-isolated nuclear structures for design and beyond-design basis earthquake shaking. Technical Report MCEER0-09-0008. c2009.
3. Computer and Structures, Inc. SAP2000 linear and nonlinear static and dynamic analysis and design of three-dimensional structures. CSI, Berkeley, California. c2004.
4. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSEES: open sys-

- tem of earthquake engineering simulation, pacific earthquake engineering center, Univ. of Calif., Berkeley (<http://opensees.berkeley.edu>). c2007.
5. Lee SJ, Park KS, Lee JH, Lee IW, Guidelines of designing LRB for a cable-stayed bridge to reduce seismic responses, Conference Proceeding of the Korean Society of Civil Engineers, 2003;914-920.
 6. Song JK, Son MK, Effect of bouc-wen model and earthquake characteristics for responses of seismically isolated nuclear power plant by lead-rubber bearing, EESK J Earthquake Eng. 2017;21(2): 95-103.
 7. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R, An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, Journal of Earthquake Engineering. 2006;10(S1):67-89.
 8. Seok CG, Song JK, Seismic performance evaluation of seismically isolated nuclear power plants considering various velocity-dependent friction coefficient of friction pendulum system, EESK J Earthquake Eng. 2016;20(2):125-134.
 9. Huang YN, Whittaker AS, Luco N, Maximum spectral demands in the near fault region, Earthquake Spectra. 2008;24(1):319-341.
 10. Stewart JP, Abrahamson NA, Atkinson GM, Baker JW, Boore DM, Bozorgnia Y, Campbell KW, Comartin CD, Idriss IM, Lew M, Mehrain M, Moehle JP, Naeim F, Sabol TA, Representation of bidirectional ground motions for design spectra in building codes, Earthquake Spectra, 2011;27(3):927-937.
 11. Boore DM, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Orientation-independent measures of ground motion, Bulletin of the Seismological Society of America, 2006;96(4A):1502-1511.
 12. American society of civil engineers, seismic analysis of safety-related nuclear structures, ASCE, Structural Engineering Institute, ASCE/SEI 4-16, Reston, Virginia, c2017.
 13. Korea electric power industry code, KEPIC-STC seismic design isolations, Korea Electric Association, Forthcoming.
 14. Kammerer AM, Whittaker AS, Constantinou MC, Technical considerations for the seismic isolation of nuclear facilities, NUREG-XXXX, United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), Washington DC, c2012.
 15. Kim BS, Song JK, Seismic responses of seismically isolated nuclear power plant structure considering post-yield stiffness of EQS bearing, EESK J Earthquake Eng. 2016;20(5):319-329.